

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort .....</b>	<b>III</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>V</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>VI</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>X</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XV</b>
<b>Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes .....</b>	<b>XVI</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund .....	1
1.2 Motivation und Forschungsfragen .....	6
1.3 Zielstellung und Lösungsansatz .....	8
<b>2 Erzeugungsanlagen mit Vollumrichter: Modell, Fault Ride-Through und Klassifikation .....</b>	<b>13</b>
2.1 Modell einer Vollumrichteranlage .....	13
2.1.1 Innere Regelschleife .....	14
2.1.2 Äußere Regelschleife .....	15
2.1.3 Synchronisation .....	16
2.2 Regulatorischer Rahmen für das Fault Ride-Through .....	17
2.3 Klassifikation hinsichtlich netzdienlicher Eigenschaften .....	19
<b>3 Grenzen der Wirk- und Blindstromeinspeisung von Vollumrichteranlagen.....</b>	<b>23</b>
3.1 Verlust des synchronen Netzbetriebs von Vollumrichteranlagen .....	24
3.1.1 Frequenzabfall bei kapazitivem Anlagenverhalten.....	25
3.1.2 Frequenzanstieg bei generatorischem Anlagenverhalten.....	26
3.1.3 Synchroner Netzbetrieb bei angepasstem Kurzschlussstrom .....	27
3.1.4 Vergleich der Spannungen am Netzanschlusspunkt .....	29
3.1.5 Analyse der Frequenzabweichung .....	30
3.2 Grenzen der Wirk- und Blindstromeinspeisung einer Vollumrichteranlage im Kurzschlussfall .....	31
3.2.1 Wirkung einer kapazitiven Blindstromeinspeisung auf die Knotenspannung	33
3.2.2 Wirkung einer Wirkstromeinspeisung auf die Knotenspannung .....	36
3.2.3 Mathematische Beschreibung und Auswertung der Grenzen .....	37
3.2.4 Einschränkung der Grenzen der maximal einspeisbaren Ströme .....	40
3.3 Unangemessene Kurzschlussstromberechnung in der iterativen Kurzschlussstromberechnung .....	41
<b>4 Einführung in die Kurzschlussstromberechnung.....</b>	<b>45</b>
4.1 Kurzschlussstromzeitverlauf und charakteristische Kurzschlussstromkenngrößen..	46
4.2 Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms .....	49
4.2.1 Überlagerungsverfahren.....	50
4.2.2 Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle .....	54

<b>5 Mathematische Beschreibung des Kurzschlussstrombeitrags unterschiedlich geregelter Volumrichteranlagen .....</b>	<b>59</b>
5.1 Kurzschlussstrombeitrag netzfolgender Volumrichteranlagen .....	60
5.2 Kurzschlussstrombeitrag von als Stromquellen implementierten netzstützenden Volumrichteranlagen .....	60
5.2.1 Kurzschlussstrom bei stabilem Betriebsverhalten .....	61
5.2.2 Kurzschlussstrom bei instabilem Betriebsverhalten .....	63
5.3 Kurzschlussstrombeitrag von als Spannungsquellen implementierten netzstützenden und netzbildenden Volumrichteranlagen.....	64
5.3.1 Netz mit direkt gekoppelten Synchrongeneratoren.....	65
5.3.2 Inselnetz ohne direkte gekoppelte Synchrongeneratoren .....	67
<b>6 Einbindung von Volumrichteranlagen in das Überlagerungsverfahren.....</b>	<b>69</b>
6.1 Anwendung des Überlagerungsprinzips auf den Änderungszustand des Überlagerungsverfahrens.....	69
6.2 Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms .....	72
6.2.1 Aufbau der Matrizen.....	74
6.2.2 Initialisierung .....	76
6.2.3 Iterative Berechnung .....	77
6.2.4 Abschließende Berechnungen.....	78
6.2.5 Berechnung der Kurzschlussströme netzbildender Volumrichteranlagen....	79
6.2.6 Identifikation instabiler Volumrichteranlagen.....	81
6.2.7 Berechnung der Kurzschlussströme netzstützender Volumrichteranlagen ..	82
6.3 Mögliche Konvergenzprobleme aufgrund iterativen Springens zwischen zwei Punkten auf der Blindstrom-Spannungsfall-Charakteristik.....	85
<b>7 Fallstudie A: Windpark mit zehn Windenergieanlagen .....</b>	<b>87</b>
7.1 Betriebspunktunabhängige Berechnung der Anfangs-Kurzschlusswechselströme ..	89
7.2 Betriebspunktabhängige Berechnung der Anfangs-Kurzschlusswechselströme .....	90
7.2.1 Kurzschlussströme ohne netzbildende Volumrichteranlagen.....	90
7.2.2 Kurzschlussströme mit netzbildenden VU.....	96
<b>8 Fallstudie B: Windsammelschiene mit 88 Windparks .....</b>	<b>103</b>
8.1 Netzreduktion .....	104
8.2 Berechnungsergebnisse .....	105
<b>9 Zusammenfassung .....</b>	<b>111</b>
<b>10 Ausblick .....</b>	<b>115</b>
<b>11 Anhang.....</b>	<b>117</b>
11.1 Matrixoperationen .....	117
11.1.1 Elementweise Matrizenmultiplikation.....	117
11.1.2 Elementweise Matrizendivision.....	117
11.2 Übertragungsfunktion der spannungsorientierten Vektor-Stromregelung.....	117
11.3 Betriebsmitteldaten und Impedanzen der Simulationsanordnung in Bild 3.1.....	118
11.4 Berechnung der Torimpedanzen des fehlerbehafteten Netzes .....	120

11.5	Kurzschlussstromkenngrößen .....	122
11.6	Empirische Analyse notwendiger Vollumrichteranlagen .....	123
11.7	Betriebsmitteldaten zu Kapitel 7 .....	124
11.8	Optimaler Blindstrombeitrag zur Maximierung des Kurzschlussstrombeitrags .....	125
11.9	Betriebsmitteldaten zu Kapitel 8 .....	126
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>129</b>